

# 3<sup>ème</sup> conférence Africaine de la CIID

29 Novembre 5 Décembre Bamako

Sous thème 3 : Productivité de l'eau à usage agricole face aux défis du changement climatique:

## **Titre: L'Office du Niger au Mali: d'une surconsommation des ressources en eau de surface en période d'étiage vers une utilisation agricole des eaux souterraines**

**Bréhima TANGARA<sup>1</sup>, Bruno LIDON<sup>2</sup>, Amadou Zanga TRAORE<sup>3</sup>, Kabirou N'DIAYE<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>IER Niono Mali, <sup>2</sup> CIRAD UMR G-eau F-34398 Montpellier Cedex France, <sup>3</sup> ENI Bamako Mali,

<sup>4</sup>Africa Rice St Louis Sénégal.

### **Résumé**

*Depuis sa création l'Office du Niger a progressivement accru ses prélèvements de la ressource en eau du fleuve Niger sous l'effet conjugué d'une faible efficacité et d'une demande croissante due au développement des superficies aménagées et de la double culture en particulier de riz. Cette tendance est renforcée par un accroissement de la demande en eau d'irrigation des cultures du fait d'une baisse notable des pluies (460 mm/an au cours des vingt dernières années contre 600 mm/an au cours des 20 précédentes, des fortes températures, et d'une forte évapotranspiration (2430 mm/an). Face à des débits du Niger qui ont été très variables au cours des 50 dernières années, les prévisions quant aux disponibilités futures en eau pour l'irrigation restent contradictoires. Il est de ce fait difficile d'évaluer l'impact à attendre de l'effet conjugué du changement climatique et de l'intrinsèque variabilité du climat et des effets anthropiques (futurs barrages entre autres). Dans ce contexte, l'augmentation de la demande en eau, particulièrement en contre saison, pourrait, comme dans tous les grands périmètres irrigués du monde, être en partie satisfaite par l'exploitation de la nappe, faisant de sa remontée un atout. Cet article vise à évaluer l'impact de l'extension des surfaces cultivées et en particulier du développement des cultures de contre-saison sur la dynamique de la nappe dans les périmètres irrigués du Kala inférieur de la zone ON. Il tend à montrer que même si la marge d'amélioration de l'efficacité de l'irrigation reste très importante, les pertes structurelles continueront à recharger la nappe de façon non négligeable. Face à une ressource en eau limitée en contre saison, il tend à conclure que l'exploitation de cette ressource en eau pourrait significativement contribuer à sécuriser le développement des cultures de saison sèche. Comment valoriser ce potentiel dans le contexte technologique, socio-économique et institutionnel de l'Office du Niger est d'ailleurs au centre d'une réflexion à laquelle de nombreux projets tentent depuis peu d'apporter les premiers éléments de réponse (PCDA, FODESA, l'IWMI, étude des ressources en eau souterraine en vue de leur exploitation durable à des fins d'irrigation commanditée par le SDD-ZON entre autres).*

**Mots clés :** Office du Niger, changement climatique, gestion de l'eau, cultures de contre-saison ressources en eau souterraine.

### **Abstract**

*Since its inception, the Office du Niger has gradually increased water withdrawals from Niger River due to the development of new irrigated area during rainy and dry season. The notable decrease of rainfall (460 mm / year over the past two years against 600 mm / year over the previous 20 years, the high temperatures and high evapotranspiration rate (2430 mm / year) have significantly contribute to amplify this demand. Because of Niger high variability of Niger flows during the last 50 years, predictions about availability of water for irrigation are contradictory. It is therefore difficult to assess to the combined impact of climate change, climate variability and, anthropisation of the area (including future dams). As in all the major irrigated areas of the world, a part of water demand could be supplied from ground water during dry season, making groundwater levels raising an asset for irrigated agriculture. This paper aims to assess to what extent the development of irrigated areas, especially during dry season, has impacted the dynamics of ground water tables. It specifically concerns Kala Inférieur area, which is a component of Office du Niger.*

*It assumes that, while there is considerable scope for irrigation efficiency improvement, the structural water losses would continue to significantly supply groundwater systems.*

*It concludes that the development of ground water resources may be a solution to cope with water scarcity during dry season and thus ensure the ongoing double cropping development.*

*The purpose of this communication is to contribute to the debate on ground water development in Office du Niger area within the ongoing studies conducted by several engineering and research institutions ( PCDA FODESA survey, IWMI study sponsored by the SDS-ZON.....).*

**Keywords :** Office du Niger, Climate change, water management, off season crops, ground water resources.

# 1 Introduction

---

A l'Office du Niger comme dans beaucoup de périmètres irrigués, le développement de l'irrigation et les pratiques culturales qui l'accompagnent ont provoqué une remontée générale du niveau de la nappe phréatique. Le toit de la nappe régionale qui était à une profondeur 40 m au droit des périmètres il y a 50 ans ([N'Diaye K, 1987](#)) était déjà à moins de 2 m il y a 15 ans; du fait des caractéristiques du réseau et des pratiques d'irrigation ([Barral, 1996](#)). Au cours des dix dernières années, sous l'effet de l'extension des surfaces irriguées et des cultures de contre-saison (rizicoles et maraîchères) et du fait d'une capacité de drainage limitée ([Keita, I., Belieres, J.-F., and Sidibe, S. 2001](#)), la nappe est devenue sub-affleurante dès la mi-campagne quelle que soit la saison culturale. Cette situation provoque un engorgement de la majorité des drains et d'un nombre croissant de parcelles. Outre induire des surcoûts de production et une diminution de la qualité et de la quantité de la récolte ([Vandersypen, 2008](#)), ces conditions augmentent les risques d'alcalinisation-sodisation des sols ([Marlet et N'Diaye, 2002](#)); elles favorisent en effet les remontées capillaires sous l'effet de la forte évaporation potentielle (2430 mm/an). Dans le même temps, l'extension des cultures de contre saison a induit une augmentation de la demande en eau qui, à terme, devrait atteindre en période d'été un niveau proche de celui des ressources en eau mobilisables du fleuve Niger si la dynamique de développement des cultures de contre saison devait se poursuivre. Cet article vise à évaluer dans quelle mesure l'utilisation des ressources en eau souterraines pourrait en contre saison se substituer, au moins en partie, aux eaux fournies par le réseau d'irrigation. Il constitue en cela une contribution à la recherche de solutions permettant d'assurer la poursuite de la dynamique de développement agricole dans un contexte où tout conduit à prédire que les ressources en eau seront de plus en plus limitées en contre saison du fait du changement climatique.

La méthodologie utilisée est basée sur une analyse des bilans d'eau au cours de ces 20 dernières années ([Tangara, 2011](#)). Ces bilans ont été établis au niveau d'échelle du Kala Inférieur qui regroupe les secteurs de Niono, N'Débougou et Molodo soit de l'ordre de 35 000 ha aménagés. Ils ont été réalisés sur la base des données de suivi piézométriques de la nappe régionale et locale ([Tangara, 2011](#)), de l'analyse des performances de l'irrigation en saison des pluies ([Vandersypen, 2008](#)) et saison sèche ([Tangara, 2011](#)) et d'une synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'étude ([Tangara, 2011](#)) ([AHT – BETICO \(2011\)](#)). Elle aborde successivement (i) l'estimation du potentiel des ressources en eaux souterraines disponibles dans la zone, (ii) la relation entre dynamique de la nappe et développement des cultures, (iii) les possibilités de mobilisation de cette ressources et l'impact à en attendre sur la dynamique de la nappe. Elle conclue en suggérant un certain nombre d'actions de recherche qu'il serait nécessaire de mener pour s'assurer de la faisabilité d'une exploitation durable des ressources en eau souterraine (i.e suivi des flux de la nappe, qualité de l'eau souterraine, élaboration de référentiels technico-économiques).

## 2 Contexte de l'étude

---

### 2.1 Situation de la zone d'étude au sein de l'Office du Niger.

La zone d'étude est située sur le système Sahel qui est le plus important des 3 systèmes hydrauliques de l'Office du Niger (Sahel, Macina, Costes-Ongoiba) alimentés en eau par le barrage de Markala (*cf. Figure 1*). D'une capacité maximale de 110 m<sup>3</sup>/s, le système Sahel permet l'irrigation du Kala inférieur et du Kouroumari. Le canal du Sahel d'une longueur de 24 Km alimente à partir du point A un ancien défluent du fleuve Niger, le *Fala* de Molodo.

Le Fala de Molodo est divisé en deux biefs égaux de 56 Km de longueur par un ouvrage régulateur en un point dénommé Point B. C'est au niveau de cet ouvrage que sont alimentés en eau les périmètres irrigués de la zone d'étude qui sont en majorité localisés en aval (environ 32400 ha aménagées, couvrant les zones de Niono, Molodo, et N'Débougou). Le second bief se termine au point C par une digue transversale et un déversoir de sécurité qui permet, outre la régulation du plan d'eau, de desservir les périmètres du secteur de Kouroumari et un troisième bief en cours d'aménagement.

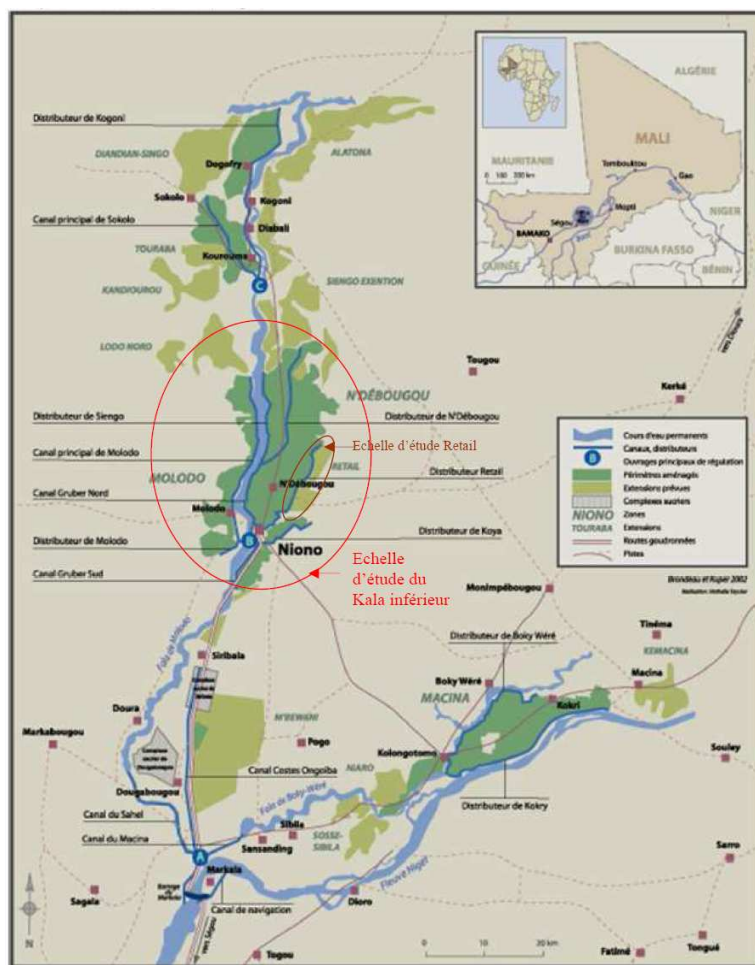


Figure 1 : Carte de répartition physique des périmètres de l'Office du Niger. Source : DADR, 2000

## 2.2 Conditions climatiques.

L'Office du Niger se situe à la limite nord de la zone soudano-sahélienne. Les précipitations sont en moyenne de 433 mm/an (1970 à 2005). Concentrées de juin et septembre, elles s'étalent de mai à octobre, (*Figure 2*). Elles présentent une forte variabilité entre 300 à 600 mm (*Dicko, 2005*) et des épisodes secs marqués 460 mm/an sur les vingt dernières années contre 600 mm/an sur les 20 précédentes (*Jamin, 1994*).

Deux saisons sèches succèdent l'hivernage : la saison sèche froide, de novembre à février avec des températures variant entre 11 et 25°C, et la saison sèche chaude de mars à avril, avec

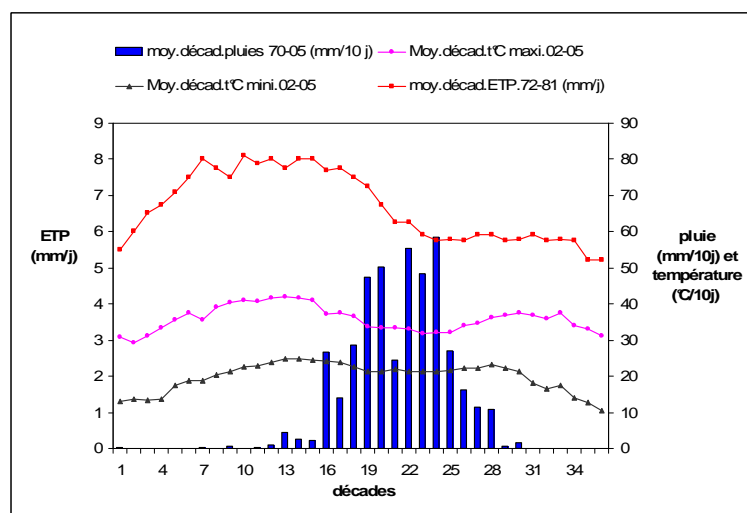


Figure 2 : Variation au cours de l'année des principaux facteurs agro climatiques de la zone Office du Niger. (Données Station Niono Sahel pour la période 1970-2005)

des températures les plus élevées entre 31 et 42°C. Cette période sèche (de novembre à avril, voir mai), au cours de laquelle sont pratiquées la riziculture (double culture) et le maraîchage, est encore appelée contre-saison.

L'évaporation potentielle moyenne, 2430 mm/an étant largement supérieure au volume d'eau précipité, induit un bilan hydrique largement déficitaire sur quasiment, toute l'année. L'irrigation reste la seule alternative pour combler ce déficit hydrique.

### 2.3 Caractéristiques hydrogéologiques et pédologiques de la zone d'étude

Localisée à la limite Sud Ouest du delta mort du Niger, la zone d'étude qui se situe à l'ouest du secteur hydrogéologique 15a (source DNHE) en présente la succession des strates géologiques caractéristiques ([Valenza A., 1996](#)) : couverture alluviale, continental terminal et substratum infracambrien (*cf* **Tableau 1** ).

Tableau 1 : Caractéristiques des différentes strates géologiques au sein de la zone d'étude

Couches géologiques	Description lithologique	Propriétés	Epaisseurs	Age
<b>Couverture quaternaire</b>	alluvions anciennes ou récentes : dépôts de sable dunaire et alluvions fluviales	Alluvions du réseau du (Niger) T : $2.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ Coef emmag : $1.2 \cdot 10^{-4}$ Porosité : 10 – 20%	5 à 10 m	Quaternaire
<b>Continental terminal :</b>	Formation argilo-sableuse(sables fins à grossiers, à disposition lenticulaire, localement grésifiés)	Homogène et perméable, important niveau d'aquifère vital T : $10 \text{ à } 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ Coef emmag : $1.2 \cdot 10^{-4}$ Porosité : 10 – 20%	10 à 60 m (moy. 35 m)	Début Tertiaire
<b>Continental intercalaire :</b>	Formation argilo-sableuse (sables fins à grossiers, à disposition lenticulaire, localement grésifiés)			Fin du Secondaire
<b>Sédiments gréseux</b>	Grès de Koutiala et de Bandiagara) :	Durs et fracturés (diaclasses, failles)	20 à 40 m	Ordovicien
<b>Schistes de Toun</b>		Imperméables	100 m	400 Ma

La limite Ouest de la zone d'étude borde le système aquifère de type infracambrien tabulaire dont les caractéristiques sont différentes ; formations gréso schisteuses ayant une transmissivité 10 fois plus faible.

### 2.4 Dynamique de la mise en valeur agricole augmentant les prélèvements en contre saison.

Depuis 1996, l'Office du Niger a été le théâtre d'un fort développement agricole. Alors que les surfaces rizicultivées en hivernage ont progressé de 65%, passant de 50 000 ha à près de 90 000 ha (dont 10 000 ha hors casiers), les rendements augmentaient de 25% (4,6t/ha en 1995/96, 5,7 t/ha en 2003/2004). Dans le même temps les surfaces des cultures de contre saison étaient multipliées par 8 pour atteindre 21 000 ha en 2007 ([Vandersypen, 2008](#)). Si les prélèvements sur le Niger au cours de la campagne d'hivernage restent marginaux par rapport aux disponibilités, ceux de contre saison ont représenté en moyenne 50% des disponibilités en eau [source SERP] entre 2000 et 2006. Ce taux augmente de façon très importante en période d'étiage (de mars à mai).

## 3 Matériel et méthode

### 3.1 Données utilisées pour estimer la relation entre l'évolution des bilans d'eau et celle de la mise en valeur agricole.

La relation entre dynamique de la nappe a été réalisée à partir :

- D'un suivi piézométrique de la nappe régionale en Novembre 1995, Novembre 2001, Novembre 2006 et Mai 2007,



- D'un suivi de la nappe locale au sein du casier Retail afin d'identifier les relations entre nappe régionale et nappe locale,
- D'une cartographie de la cote du toit du substratum et du continental terminal
- D'un récapitulatif des surfaces cultivées entre 1995 et 2007 sur l'ensemble des périmètres de la zone d'étude
- D'une synthèse des performances de l'irrigation au sein de la zone d'étude.

➤ **Données descriptives de l'évolution du toit de la nappe régionale entre Novembre 1995 et Mai 2007.**

L'évolution du niveau piézométrique de la nappe a été réalisé à partir des données fournies par le suivi d'un réseau piézométrique constitué de 221 puits profonds productifs situés au sein d'un rectangle encadrant les aménagements de l'ON ayant une longueur de Sud Nord de 122,31 Km (entre les latitudes 14°50' et 13°40' N) et une largeur Est Ouest de 70,5 km (entre les longitudes 6°40' et 5°30' W) (**Figure 3**). Sur chaque site, préalablement caractérisé par ses coordonnées géographiques (altitude de la margelle ou d'un repère fixe, longitude, latitude), la profondeur de l'eau a été systématiquement mesurée en utilisant une sonde électrique. Les niveaux d'eau mesurés ont été considérés comme ceux du toit de l'aquifère du Continental Terminal-Quaternaire sur la base des conclusions de l'étude réalisée par la Direction National de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali ([PNUD DNHE 1990](#)).

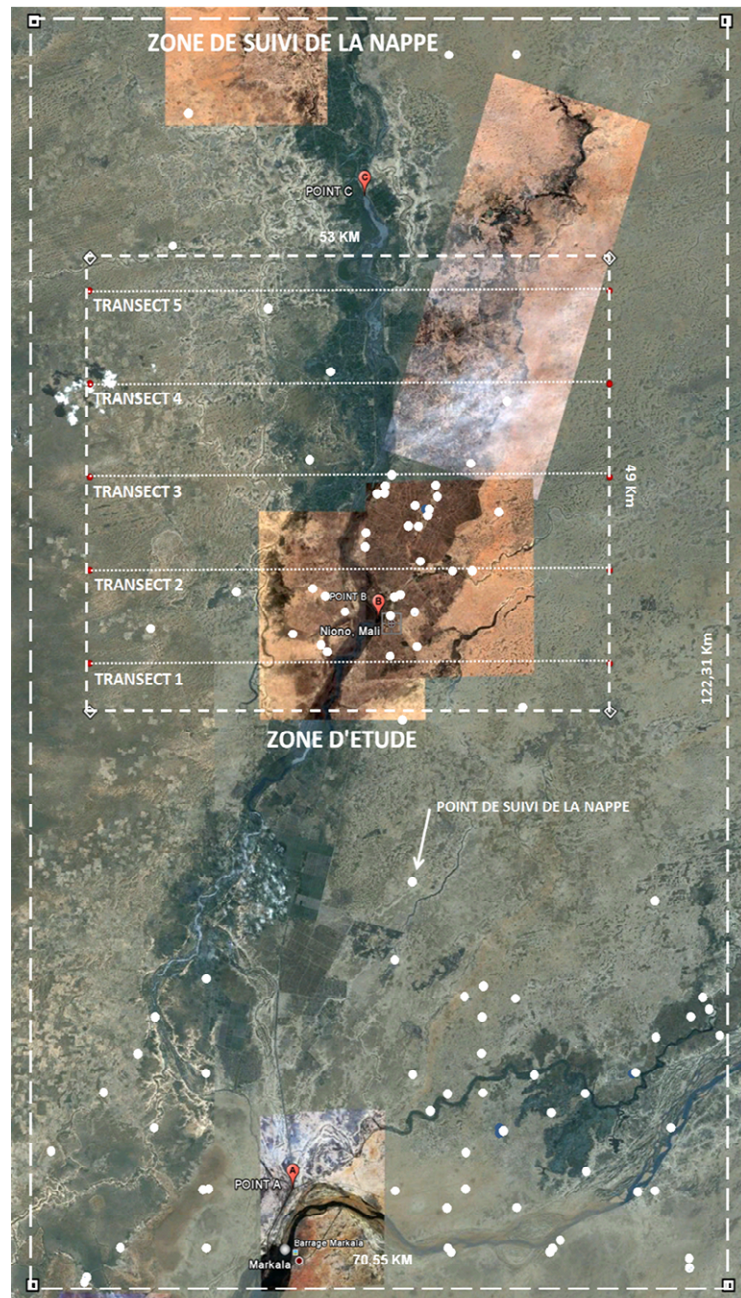


Figure 3 :Points de suivi de la nappe régionale

Le suivi de ce réseau a été successivement réalisé en 1995 par le Pôle régional de recherche sur les Systèmes Irrigués (PSI), en 2001 par le projet FSP/PSI Mali, et en Novembre 2006 et Mai 2007.



➤ **Données descriptives de la dynamique de la nappe locale entre Novembre 2006 et Mai 2007 au sein du casier Retail.**

Outre un suivi mensuel du niveau de la nappe régionale réalisé sur 11 puits au cours de la contre saison (mi Décembre à mi Mai), la dynamique de la nappe locale a été caractérisée au sein du casier Retail le long de 4 transects piézométriques implantés au sein des mailles hydrauliques des partiteurs N1, N4 (Retail 1), N9 (Retail 2), qui ont toujours été exploités en contre saison depuis leur réhabilitation et d'un transect implanté sur la zone alimentée par le distributeur Retail 4 qui n'a jamais été exploité au cours de cette campagne depuis 5 ans (**Figure 4**).

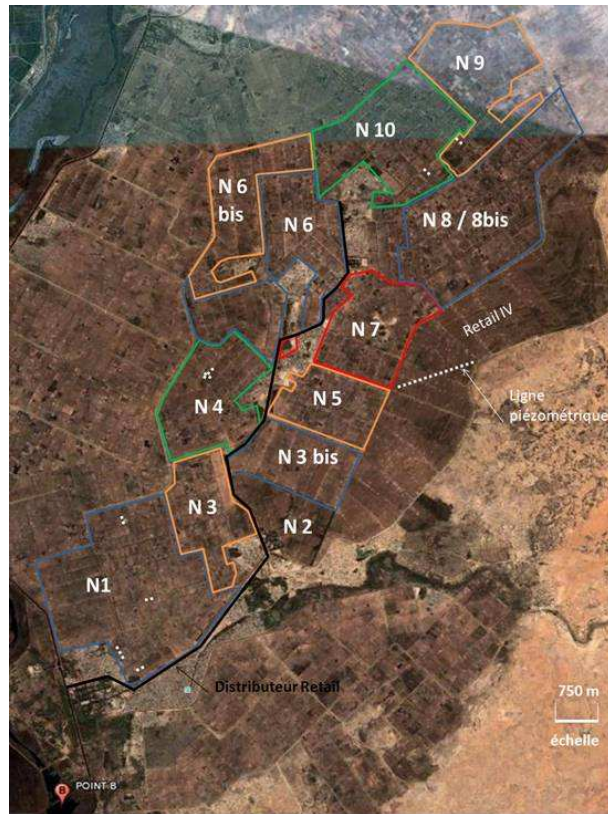


Figure 4 : Sites de suivi de la nappe locale au sein du casier Retail

➤ **Données descriptives de la cote du toit du continental terminal et du substratum.**

Les cartes de la cote du toit du continental terminal et du substratum établies dans le cadre des prospections géophysiques ([BREESS, 1996](#)) et électro-sismiques ([PNUD-DNHE, 1979](#)) ont été digitalisées et utilisées pour prendre en compte la variabilité spatiale de la puissance du quaternaire alluvial et du continental au sein de la zone d'étude (**Figure 5**).

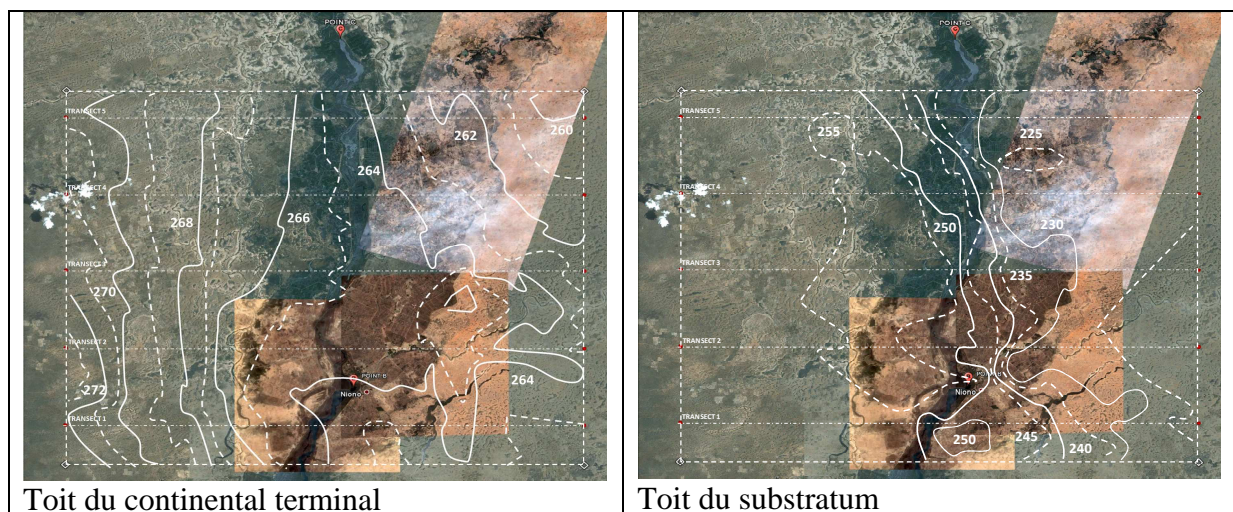


Figure 5 : Cartes du toit du substratum et du continental terminal.

➤ **Données descriptives de l'augmentation de la mise en valeur agricole des périmètres du Kala inférieur de 2001 à 2007.**

Sur chacune des 3 zones du Kala Inférieur (Niono, N'Débougou, Molodo), un relevé des surfaces cultivées entre 2001 et 2007 qui inclue les hors casiers, a été utilisée pour évaluer l'impact de leur augmentation sur la dynamique de la nappe. Ces données, qui illustrent la forte augmentation de la mise en valeur agricoles passées en hivernage et en contre saison respectivement de 31 000 à 35 000 ha et de 6 000 à 10 000 ha au cours de cette période, ont été collectées auprès des différents services de suivi évaluation des 3 zones concernées (**Tableau 2**)

Tableau 2: Evolution des surfaces cultivées (ha) entre 2001 et 2007 au sein des périmètres du Kala Inférieur.

Campagne		Zone						Total
		Niono		N'Débougou		Molodo		
		Riz	Maraichage	Riz	Maraichage	Riz	Maraichage	
2001-2002	Hivernage	12 256	-	10 202	-	8 571	-	31 029
	Contre Saison	2 004	1 500	1 799	585	226	101	6 216
2002-2003	Hivernage	13 753	-	7 943	-	8 963	-	30 659
	Contre Saison	3 300	1 564	3 223	714	1 298	191	10 290
2003-2004	Hivernage	13 668	-	10 865	-	9 012	-	33 545
	Contre Saison	2 500	1 696	2 021	1 258	657	284	8 416
2004-2005	Hivernage	14 668	-	11 462	-	9 175	-	35 305
	Contre Saison	3 500	1 713	2 380	967	971	407	9 938
2005-2006	Hivernage	14 691	-	11 328	-	9 264	-	35 283
	Contre Saison	2 600	1 289	3 258	1 049	1 365	342	9 903
2006-2007	Hivernage	14 700	-	11 449	-	9 264	-	35 413
	Contre Saison	2 500	1 947	3 261	1 005	1 178	377	10 268
Moyenne par campagne								21 355

➤ **Données descriptives des performances de l'irrigation.**

Les bilans d'eau ont été établis sur la base d'une synthèse des performances de l'irrigation sur les systèmes irrigués (**Tableau 3**). Cette synthèse a été faite à partir des études antérieurement réalisées ([Vandersypen, 2008](#)) ([Tangara, 2011](#)) ([Marlet et N'Diaye, 2002](#)).

Tableau 3 : Estimation moyenne des termes du bilan d'eau sur les zones irriguées en hivernage et contre saison

	Saison de pluies	Contre saison (50% Riz -50% maraîchage)
Volume apport en tête de distributeur m <sup>3</sup> /ha	20 000	18 000
Pluie efficace m <sup>3</sup> /ha	3 000	-
Total apport m <sup>3</sup> /ha	23 000	17 000
Besoins en eau des cultures m <sup>3</sup> /ha	9 200	9 000
Pertes au niveau arroseur m <sup>3</sup> /ha	13 000	5 000
Pertes canaux distributeur et partiteur m <sup>3</sup> /ha	3 800	3 000
Total pertes m <sup>3</sup> /ha	16 800	8 000
Percolation vers nappe m <sup>3</sup> /ha	6 000	2 000
Drain/Evaporation m <sup>3</sup> /ha	8 800	6 000
Réutilisation hors casiers m <sup>3</sup> /ha	2000	

### 3.2 Méthode d'analyse et de traitement des données.

L'analyse des données a consisté à estimer :

- L'évolution du volume de la nappe alluviale et continentale au sein de la zone d'étude.

- La relation entre nappe de sub-surface et nappe régionale
- La contribution de l'évolution des surfaces cultivées en hivernage et contre saison à la dynamique de la nappe
- Les conditions d'exploitation de la nappe pour l'irrigation des cultures de contre saison au sein des zones aménagées
- L'impact de cette utilisation sur l'évolution de la nappe.

➤ **Méthode d'estimation de l'évolution du volume de la nappe alluviale et continentale au sein de la zone d'étude.**

Elle a d'abord consisté à déterminer les courbes isopièzes au sein de la zone d'étude à partir des suivis géo-référencés du niveau du toit de la nappe régionale. Du fait de l'hétérogénéité de la distribution spatiale des points de suivi, la détermination des courbes isopièzes a été limitée à une zone de 53 Km de longueur Ouest-Est et 49 Km de large Nord-Sud encadrant les périmètres irrigués (**Figure 3**).

Les volumes des nappes ont été estimés sur des pixels de 1 km<sup>2</sup> en tenant compte des cotes du toit du continental terminal et du substratum par les équations ci-dessous :

$$V_{nappe-alluviale} = \sum_{y=1}^{y=49} \sum_{x=1}^{x=53} S \cdot \text{MAX}(H_{x,y} - H_{c_{x,y}}; 0)$$

$$V_{nappe-continentale} = \sum_{y=1}^{y=49} \sum_{x=1}^{x=53} S \cdot \text{MAX}((H_{x,y} - H_{s_{x,y}} - \text{MAX}((H_{x,y} - H_{c_{x,y}}); 0)) \cdot S; 0)$$

Avec

$V_{nappe-alluviale}$  et  $V_{nappe-continentale}$  volume des nappes en millions de m<sup>3</sup>

$H_{x,y}$  cote de la nappe en m au point x y

$H_{c_{x,y}}$  cote du toit du continental en m au point x y

$H_{s_{x,y}}$  cote du toit du substratum au point x y

$S$  surface du pixel 1 Km<sup>2</sup>

➤ **Méthode d'estimation de la relation entre nappe de sub-surface et nappe régionale**

Pour déterminer si la nappe régionale était connectée à la nappe locale à l'aplomb des zones irriguées, la cote de la nappe locale en saison sèche a été comparée à celle de la nappe régionale évaluée à partir de la détermination de ses isopièzes.

➤ **Méthode d'estimation de la contribution de l'évolution des surfaces cultivées en hivernage et contre saison à la dynamique de la nappe.**

L'estimation a été réalisée en établissant un bilan d'eau moyen du système entre Novembre 2001 et Novembre 2006 d'une part et entre Novembre 2006 et Mai 2007 d'autre part, puis en optimisant la valeur de la porosité totale et efficace, des apports du fala et du débit de fuite dans le substratum en calant le modèle de telle sorte que les données de volume de nappes évaluées et simulées en 2006 et 2007 soient du même ordre de grandeur.

Le bilan d'eau a été estimé en million de m<sup>3</sup> par l'équation suivante :

$$\Delta V = A_{P_{S\_non\_irrig}} + A_{Sc} + A_{Fala} - Evap - N_{S\_non\_irrig} - Vol_{Fuite_{substratum}} \text{ Avec}$$

$\Delta V$  Différence de volume d'eau stocké dans la nappe en relation avec le volume de la nappe

$\Delta V_{nappe}$  par les équations :

$\Delta V = Pt \cdot \Delta V_{nappe}$  au pas de temps annuel avec  $Pt$  porosité totale moyenne

$\Delta V = Pe \cdot \Delta V_{nappe}$  entre fin de saison sèche et début de la saison des pluies avec

$Pe$  porosité efficace moyenne



$A_{P_{S\_non\_irrig}}$  Apport de la pluie des surfaces non irriguées estimé en fonction de la profondeur de la nappe par l'équation dans le cas d'un aquifère généralisé ([AHT– BETICO \(2011\)](#)) :

$$A_{P_{S\_non\_irrig}} = \frac{(49).(53) - Surface\_cultivée(ha).10^{-2}}{(49).(53)} \cdot \sum_{y=1}^{y=49} \sum_{x=1}^{x=53} Pe.f(Htn_{x,y} - H_{x,y}).10^{-3}$$

Avec :

$Htn_{x,y}$  Cote du terrain naturel

$Pe$ . Pluie efficace annuelle en mm

$$f(Htn_{x,y} - H_{x,y}) = 1.5841.(Htn_{x,y} - H_{x,y})^{-1.492}$$

$A_{Sc}$  Apport des surfaces cultivées estimé en fonction de la profondeur de la nappe par l'équation

$$A_{Sc} = Surface\_cultivée(ha).6000.10^{-6} \text{ en saison des pluies}$$

$$A_{Sc} = Surface\_cultivée(ha) * 2000 / 1000000 \text{ en contre saison}$$

$Evap_{N_{S\_non\_irrig}}$  Evaporation nappe sur les surfaces non irriguées estimée en fonction de la profondeur de la nappe par l'équation dans le cas d'un aquifère généralisé ([AHT– BETICO \(2011\)](#))

$$Evap_{N_{S\_non\_irrig}} = \frac{(49).(53) - Surface\_cultivée(ha).10^{-2}}{(49).(53)} \cdot \sum_{y=1}^{y=49} \sum_{x=1}^{x=53} ETo.g(Htn_{x,y} - H_{x,y}).10^{-3}$$

Avec :

$Htn_{x,y}$  Cote du terrain naturel

$ETo$  Evapotranspiration annuelle en mm

$$g(Htn_{x,y} - H_{x,y}) = 0.5205.(Htn_{x,y} - H_{x,y})^{-2.792}$$

$Vol_{Fuite_{substratum}}$  Fuite de la nappe vers celle du substratum et  $A_{Fala}$  Apport Fala ont été estimés mathématiquement.

Sur la base des termes des 3 bilans d'eau établis permettant d'évaluer la différence des apports du fala et des fuites vers le substratum par l'équation

$$(A_{Fala}) - (Vol_{Fuite_{substratum}}) = \Delta V + Evap_{N_{S\_non\_irrig}} - A_{P_{S\_non\_irrig}} - A_{Sc}$$

Ces deux termes du bilan ont été déterminés mathématiquement en supposant des apports du fala constants et des fuites de la nappe proportionnelles à la surface du substratum couverte et à la puissance moyenne de la nappe alluviale et continentale, soit une relation linéaire satisfaisant l'équation :

$$(A_{Fala}) - (Q_{Fuite_{substratum}}).S_{nappe}.hm = \Delta V + Evap_{N_{S\_non\_irrig}} - A_{P_{S\_non\_irrig}} - A_{Sc}$$

Avec :

$Q_{Fuite_{substratum}}$  débit de fuite de la nappe vers le substratum en m<sup>3</sup>/ha/an

$S_{nappe}$  surface du substratum couverte par la nappe en m<sup>2</sup>

$hm$  puissance moyenne de la nappe en m

$A_{Fala}$  infiltrations provenant du fala contribuant à la nappe en m<sup>3</sup> par an

Cette relation linéaire a été établie en utilisant la porosité totale et efficace pour paramétrer le bilan de telle sorte que sur les zones irriguées la descente de la nappe simulée soit du même ordre de grandeur que celle observée.

Ce modèle a ensuite été utilisé pour estimer l'impact de l'utilisation des eaux souterraines sur la dynamique de la nappe.

➤ **Méthode d'estimation de la possibilité d'utiliser pour l'irrigation des cultures de contre saison au sein des zones aménagées**

Sur la base des caractéristiques hydrogéologiques disponibles et de l'évaluation du niveau de la nappe, les possibilités d'utilisation de la nappe ont été évaluées en prenant en compte :

La densité de puits réalisables de telle sorte que leur zone d'influence ne se chevauche pas.

Pour ce faire l'équation empirique de Sichardt a été utilisée :

$$R_m = 3000.(H - h).\sqrt{K_s}$$

Avec

$R_m$  Rayon de la zone d'influence en m

$(H - h)$  Rabattement de la nappe en m

$K_s$  Conductivité hydraulique en m/s

La gamme de débits de pompage envisageable en fonction des diamètres des puits et de leurs profondeurs a été déterminée en utilisant :

La formule de Dupuis lorsque le fond du puits atteint le substratum

$$Q = \pi.K_s \cdot \frac{(H^2 - h^2)}{\ln(R_m/r)}$$

Avec :

$Q$  Débit du puits en m<sup>3</sup>/s

$H$  Puissance de la nappe en m

$h$  Hauteur dynamique de la nappe au cours du pompage

$r$  Rayon du puits en m

La formule empirique de Vibert lorsque le fond du puits n'atteint pas le substratum

$$Q = \pi.K_s \cdot \frac{H.h'}{\ln(R_m/r)}$$

Avec :

$h'$  Rabattement de la nappe en cours de pompage en m

## 4 Résultats et discussions

### 4.1 Une forte extension de la nappe entre 1995 et 2006.

L'exploitation des données de suivi de la nappe (**Figure 6**) montre que le niveau de la nappe régionale a varié en 11 ans de moins de 5 mètres dans les périmètres et au niveau du *Fala*, où la nappe de surface est très proche du niveau du sol, alors que dans les franges Est et particulièrement Ouest de la zone d'étude le toit de la nappe qui était à une profondeur de plus de 40 m est remontée de plus de 10 mètres.

La forme de la nappe en dôme, ayant pour axe le *Fala* et sommet du bombement les périmètres irrigués, et sa descente graduelle à mesure qu'on s'éloigne de ces structures (**Figure 7**) illustrent l'origine de son alimentation par les infiltrations d'eau au niveau du *Fala* et des zones irriguées. Ces résultats sont aussi confirmés par la synthèse des études bibliographiques sur « l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la zone de l'ON » ([AHT BETICO, 2011](#)).

Le plus important développement de la nappe à l'Est qu'à l'Ouest illustre l'interaction du pendage du substratum sur la forme de la nappe et confirme la thèse d'une évacuation principale liée à la géométrie (variation de pente) du mur de l'aquifère du Continental (toit du substratum) ([Valenza, 1996](#)). Ce constat est conforme aux observations antérieures ([Barral et al, 1997](#)) et confirmées par ([AHT-BETICO \(2011\)](#))

On notera que les transects *piézométriques* mettent en évidence une contribution non négligeable des drains principaux à l'alimentation de la nappe. Elle est particulièrement perceptible en rive droite (coté Est du *Fala*) où elle augmente du Nord au Sud à mesure que la zone drainée par le drain s'accroît.

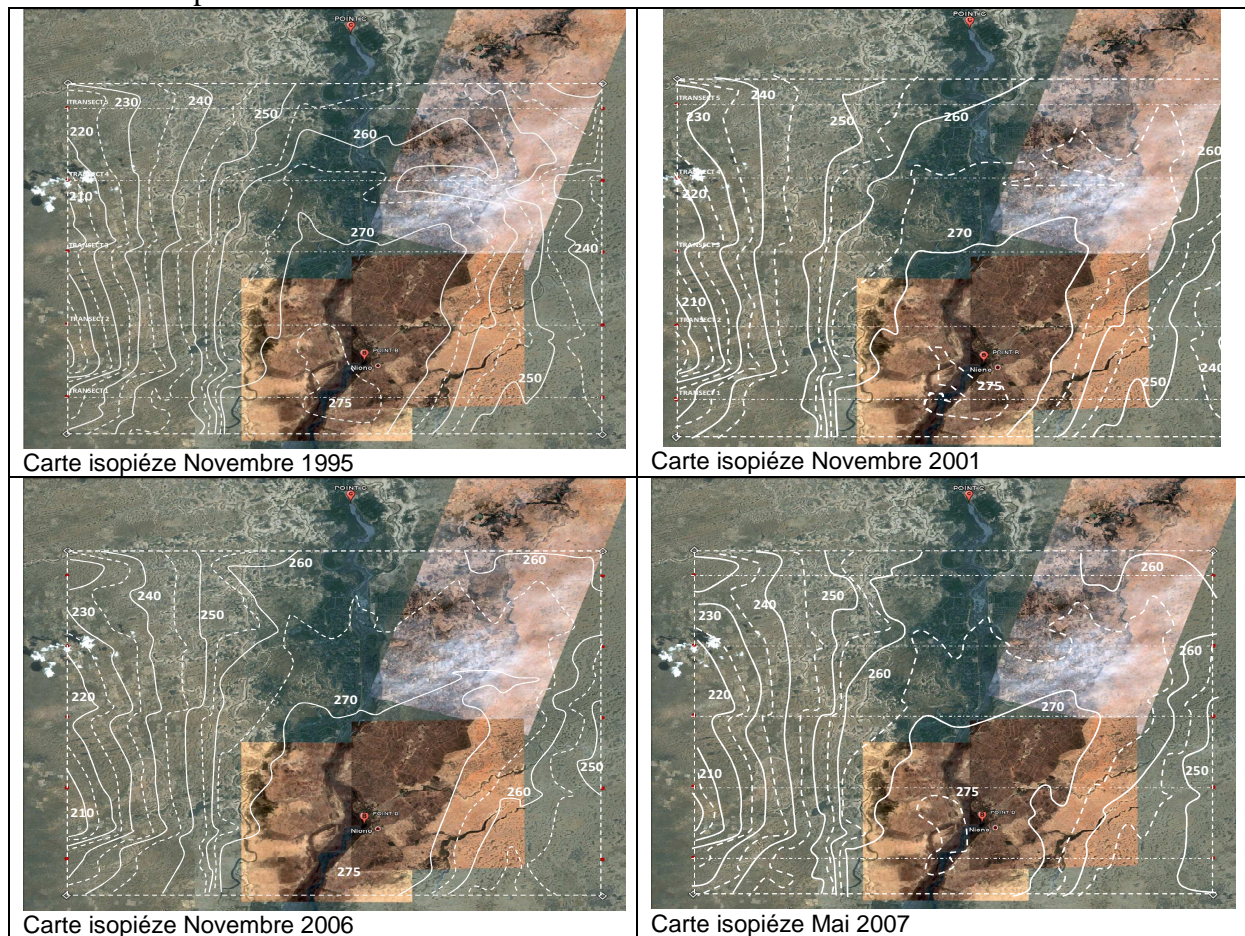


Figure 6 Cartographie du toit de la nappe régionale en Novembre 1995, 2001 et 2006 et en Mai 2007

Pour la même campagne culturale (2006-2007), un rabattement de la nappe régionale en contre-saison (Mai 2007) est constaté au sein de la zone d'étude (**Figure 6**). Le rabattement moyen de la nappe est de l'ordre d'un mètre mais plus prononcé à, de l'ordre de 2 mètres, à la périphérie des zones d'apports (aménagements) entre Novembre 2006 et Mai 2007.

Ces résultats illustrent :

- que les sources d'alimentation de la nappe régionale sont, la combinaison des infiltrations d'eau venant du Fala, des zones irriguées et des principaux drains.
- que le volume de la nappe augmente, les apports étant supérieurs à la capacité d'infiltration du substratum,
- que le dôme que forme la nappe du continental alluvial au niveau du Kala inférieur tend à augmenter son volume et à élargir sa base,
- que la drainabilité naturelle des zones irriguées tend à diminuer entre 1995 et 2006 du fait d'une diminution du gradient hydraulique, le niveau de la nappe à la périphérie des zones aménagées augmentant plus rapidement qu'à leur aplomb,
- que le niveau de la nappe est maintenu avec la mise en place des cultures de contre-saison.



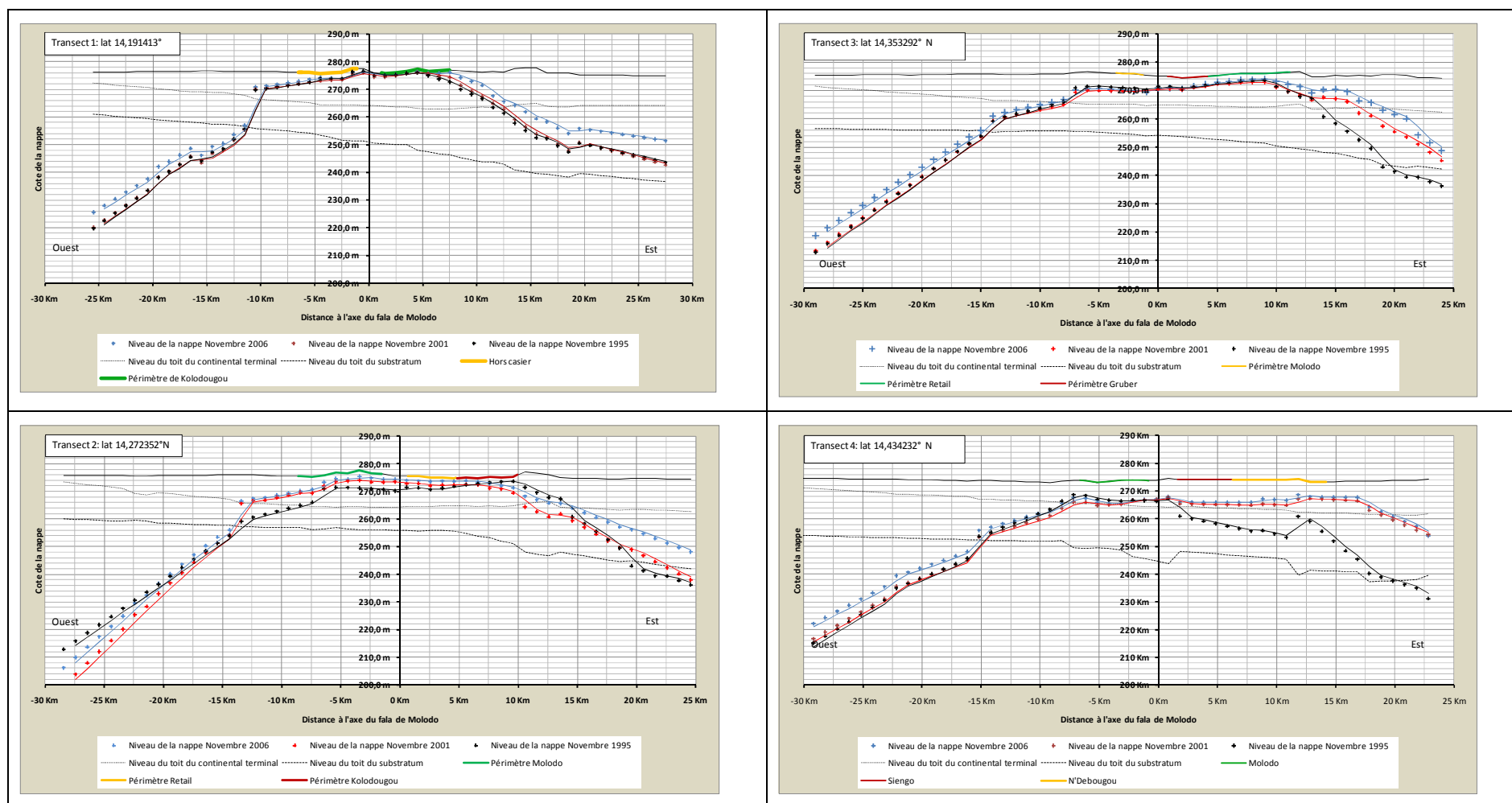


Figure 7 : Illustration de l'évolution des profils caractéristiques de la nappe au sein de la zone d'étude de 1995 à 2006.

## 4.2 Une extension de la nappe qui s'est traduite par une augmentation de son volume

Comme illustré par les cinq transects Est-Ouest descriptifs de l'évolution de la nappe au sein de la zone d'étude, l'augmentation du niveau de l'aquifère du continental a été telle que sa ligne de raccordement à la nappe du substratum est à partir de 2001 extérieure à la zone d'étude.

L'ordre de grandeur de ces volumes a de ce fait été estimé à partir d'un profil piézométrique Est-Ouest moyen de façon à pouvoir déterminer les bornes de l'aquifère continental en extrapolant la pente de la nappe et du toit du substratum comme illustré par la **Figure 8**

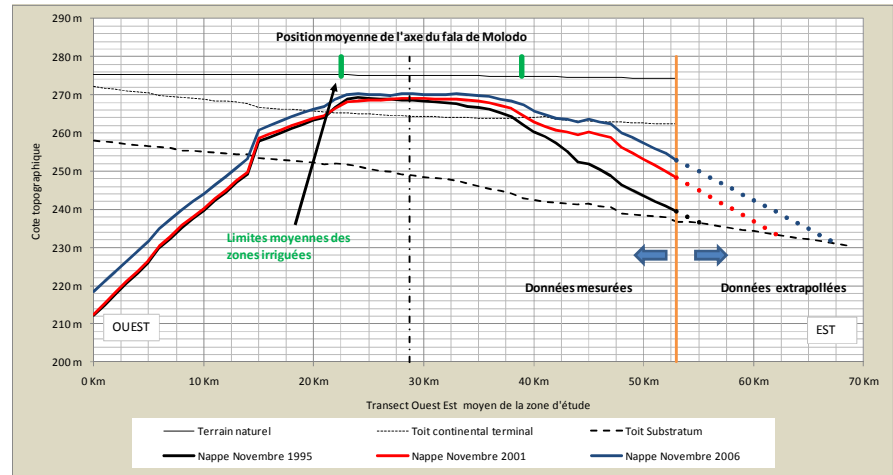


Figure 8 :Illustration des transects Ouest Est moyens au sein de la zone d'étude entre 1995 et 2006

L'estimation du volume de l'aquifère alluvial-continental réalisée sur cette base montre son augmentation rapide. Son volume est passé de 26 400 à 34 600 millions de mètres cube entre 1995 et 2001 pour atteindre 42 330 millions de mètres cube en Novembre 2006, les parts respectives de la nappe alluviale et de la nappe du continental restant à peu près constantes, respectivement de l'ordre de 10% et 90% du volume total (**Tableau 4**)

Tableau 4: Evolution du volume de la nappe régionale entre 1995 et 2006 au sein de la zone d'étude (en millions de m<sup>3</sup>).

	Volume de la nappe en millions de m <sup>3</sup>		
Date	Novembre 1995	Novembre 2001	Novembre 2006
Nappe alluviale	2 710	3 279	4 911
Nappe du continental	23 670	31 299	37 415
Nappe alluviale-continentale	<b>26 380</b>	<b>34 578</b>	<b>42 326</b>

Bien qu'elle a baissée, la nappe régionale du Continental Terminal-Alluviale en contre-saison (Mai 2007) de la campagne 2006-2007 a été évaluée à 38 552 millions de m<sup>3</sup>. Par rapport au 42 330 millions de m<sup>3</sup> estimés en fin Novembre 2006, soit seulement une perte estimée à 9% (**Tableau 5**).

Tableau 5: Evolution du volume de la nappe régionale entre Novembre 2006 et Mai 2007 au sein de la zone d'étude ( en millions de m<sup>3</sup>).

	Volume de la nappe régionale en millions de m <sup>3</sup>	
Date	Novembre 2006	Mai 2007
Nappe alluviale	4 911	3 831
Nappe du continental terminal	37 415	34 721
Nappe alluviale-continentale	<b>42 326</b>	<b>38 552</b>

### 4.3 Une nappe de surface dont tout laisse à penser qu'elle est au sein des périmètres irriguée en continuité hydraulique avec la nappe régionale.

Au sein du casier Retail, la profondeur de la nappe, en absence et sous cultures de contre-saison (double culture), a été comparée à celle de la nappe régionale au cours de la campagne culturale 2006-2007 (*Figure 9*).

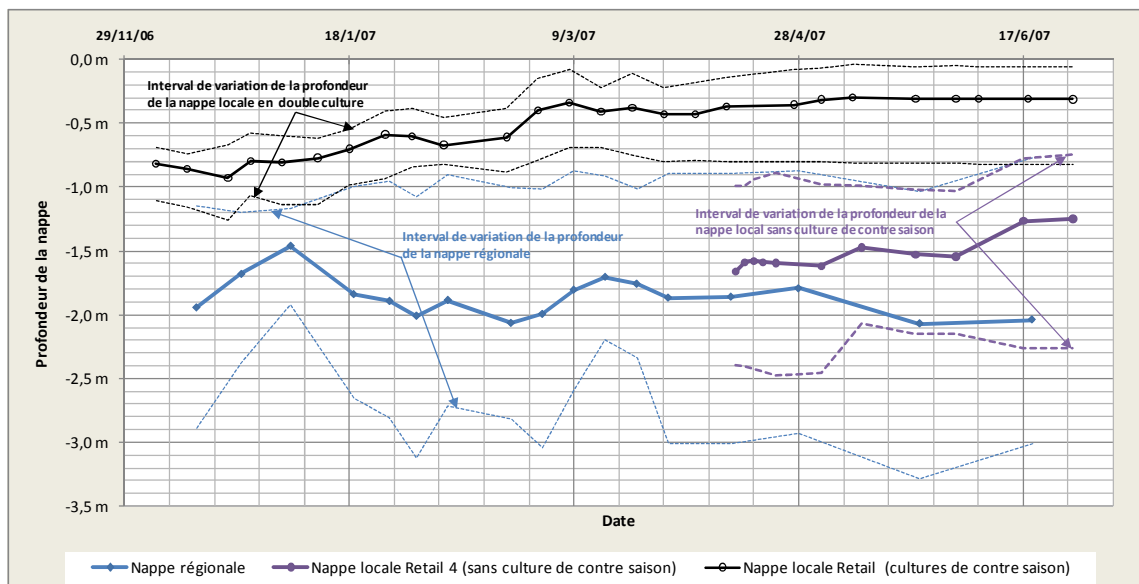


Figure 9: Evolution comparée de la profondeur de la nappe régionale et de la nappe locale au sein de la zone alimentée en eau par le distributeur Retail

Il ressort de cette analyse comparative que la plage de variation du battement de la nappe locale (moyenne de 1,5 mètre du sol) sans culture de contre-saison est incluse dans celle de la nappe régionale. L'intervalle de variation de cette dernière est la plus grande avec une moyenne de 1,75 mètre. Il y a donc tout lieu de faire l'hypothèse que les niveaux piézométriques mesurés dans les parcelles sans contre-saison sont assimilables à ceux de la nappe régionale de l'alluvial-terminal.

Sous cultures de contre-saison, la profondeur de la nappe diminue progressivement du début à la fin de la campagne culturale. Le fait que la plage de variation du battement de cette nappe locale sub-affleurante chevauche au début et vers la fin de la campagne avec celle de la nappe régionale, tend à confirmer la continuité hydraulique entre les deux nappes ([Barral & al., 1996](#)).

Cette continuité hydraulique nous permet :

- d'estimer que l'évaluation faite du volume de la nappe est quelque peu sous estimée à l'aplomb des périmètres dans la mesure où le niveau de la nappe a été estimé à partir de points de mesure situés hors des parcelles irriguées (puits situés au niveau des villages).
- de valider l'hypothèse que les performances de l'irrigation à la parcelle et en particulier l'importance des pertes par percolation sont explicatives de l'augmentation du niveau de la nappe.
- à faire l'hypothèse qu'une partie significative des eaux de surface transitant dans les drains contribue à la recharge de la nappe, volume à priori proportionnel à la surface irriguée en saison sèche et en hivernage.
- de valider l'hypothèse que la remontée générale de la nappe régionale et l'engorgement du système de drainage, sont effectivement à l'origine des difficultés rencontrées à la parcelle (engorgement des sols, risque d'alcalinisation), par le fait qu'en diminuant le gradient hydraulique entre niveau de la nappe en zone irriguée et nappe régionale, ils diminuent leur drainabilité naturelle.



#### **4.4 Une ressource en eau souterraine importante générée par les pertes liées à l'irrigation.**

L'analyse des bilans d'eau a été faite à partir des transects moyens relatifs aux périodes Novembre 1995-Novembre 2001, Novembre 2001-Novembre 2006 et Novembre 2006-Mai 2007. Les porosités totales et efficaces ont été calées de telle sorte que la baisse simulée pour la période Novembre 2006-Mai 2007 soit au sein de la zone irriguée de l'ordre de grandeur de celle observée (1m) (12.6 % porosité totale, 0.36% porosité efficace).

Les résultats de ce calage conduisent à estimer à :

- $6,92 \cdot 10^{-11}$  m/s la conductivité verticale apparente de la nappe du continental terminal limitée par celle du substratum qui est souvent considéré comme quasi imperméable.
- $1,35 \text{ m}^3/\text{s}$  la recharge de la nappe due au fala au sein de la zone d'étude. Si ce chiffre peut paraître faible, il est en partie explicable par le fait qu'au sein de la zone d'étude il est encadré par des zones irriguées dont la nappe sub-affleurante limite les flux de percolation du fala.

La Figure 10 illustre les différents termes du bilan ainsi établis pour les différentes périodes au niveau de l'ensemble de la zone couverte par la nappe continentale. Elle montre l'importance de la contribution des cultures d'hivernage.

La Figure 10 (d) montre en particulier que même sans culture de contre saison le volume de la nappe continuera à augmenter dans les conditions actuelles de gestion de l'eau.

Bien que les hypothèses prises pour modéliser ces bilans pourraient être améliorées, il y a tout lieu de conclure que dans le contexte de raréfaction de la ressource en eau due au changement climatique, cette nappe pourrait constituer un atout d'autant plus qu'elle est peu profonde dans les zones aménagées.

#### **4.5 Des ressources en eau disponibles mais difficiles à mobiliser**

L'ensemble de ces estimations a été fait sur la base de valeurs moyennes des données disponibles. Elles ne sont de ce fait qu'à considérer à titre indicatif.

##### **➤ Des débits potentiels de puits limités par des conductivités hydrauliques faibles.**

A l'aplomb des zones aménagées le toit de la nappe reste en fin de saison sèche à moins de 3 mètres de profondeur comme illustré par la Figure 9. La nappe a en moyenne une puissance de 20 à 30 mètres dont environ 10 m au sein de l'horizon alluvial et de 20 à 30 m dans le continental (cf Figure 8).

Bien que ces conditions devraient permettre l'utilisation de motopompe de surface, il y a tout lieu de penser que cette solution n'est pas envisageable, sauf situation particulière. Du fait de la très faible transmissivité moyenne de l'horizon continental (cf **Tableau 1**), les débits à attendre pour des profondeurs de rabattement de la nappe de 3.5 m (hauteur manométrique 6.5 m) seraient inférieurs à  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$  (formule empirique de Vibert). Pour mobiliser la ressource, la seule solution envisageable semble devoir être le recours à des puits d'une profondeur de plus de 15 m de sorte à atteindre le continental terminal.

L'évaluation des débits potentiels pour des puits traversant la nappe continentale est illustré figure 11. Elle donne une estimation de la gamme de leurs débits probables en fonction de leur diamètre et de la hauteur manométrique de pompage. Cette estimation a été faite en considérant la nappe du continental comme une nappe captive du fait que sa transmissivité, 10 fois plus forte que celle de l'alluvial qui la surplombe. La figure 11 montre en particulier que, pour espérer des débits supérieurs à  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  facilitant la conduite de l'irrigation, il serait nécessaire de rabattre la nappe de plus de 15 m et d'utiliser des puits de grand diamètre (2 m).

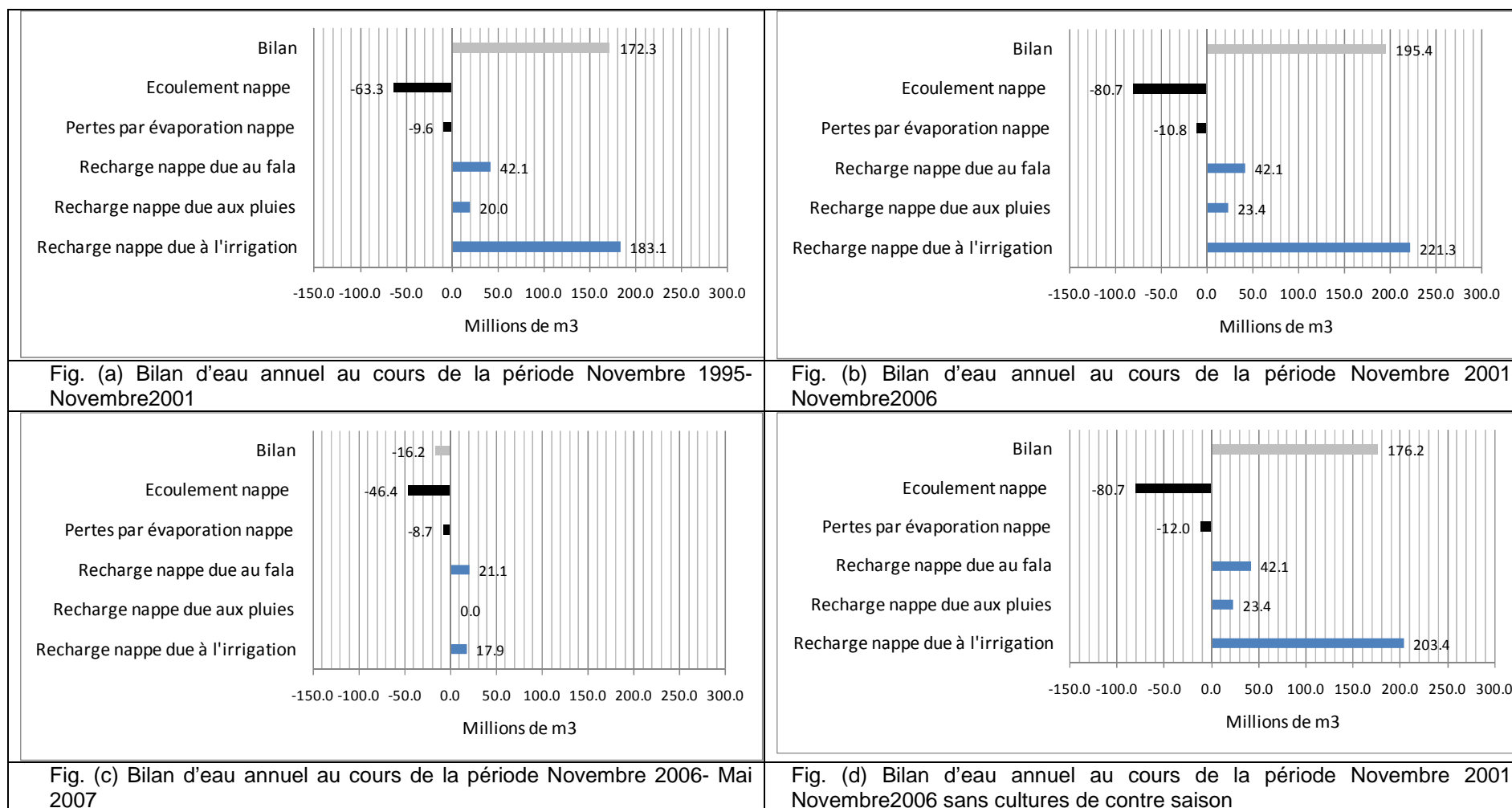
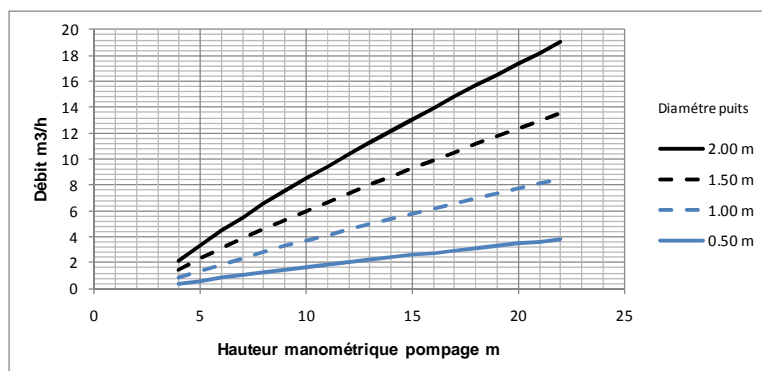


Figure 10 : Illustration des termes des bilans d'eau estimés à partir des suivis de la nappe

Figure 11 : Evaluation des débits des puits en fonction de la hauteur manométrique de pompage et du diamètre des puits.



➤ **Une utilisation agricole des eaux souterraines qui pourrait potentiellement permettre d'assurer un taux d'intensification de 120%.**

Deux cycles de culture successifs sont possibles en contre saison, l'un en saison sèche froide de Décembre à Mars (tomate, oignon, pomme de terre, blé), l'autre en saison sèche chaude de Avril à Juin (riz de cycle court).

Les besoins en eau moyens relatifs à ces deux cycles sont illustrés par le **tableau 6** qui suppose en période de pointe une durée maximum de pompage de 14 h/jours.

Tableau 6 : Estimation des besoins en eau des cultures de contre saison

Période	Culture saison sèche	
	Froide	Chaude
Besoins nets	400 mm	1100 mm
Efficience	75%	80%
Besoins bruts	533 mm	1375 mm
Kc max	1.05	1.20
Eto max	8 mm	10 mm
Débit fictif continu	1.23 l/s/ha	1.37 l/s/ha
Débit d'équipement *	2.12 l/s/ha	2.36 l/s/ha

*Durée maximum de pompage 14h/jour*

Les débits d'équipements peu différents en contre saison froide et chaude conduisent à estimer que les surfaces irrigables relatives à ces deux périodes sont du même ordre de grandeur.

Les débits d'équipement rapportés aux débits estimés ont permis d'évaluer la surface moyenne irrigable par puits pour des débits supérieurs à 3 l/s. (10 m³/h). Pour un puits ayant un diamètre de 2 mètres, cette surface varie de 3 ha à 4.75 ha, comme illustré par la figure 12. Elle est 30% plus faible pour un diamètre de puits de 1.5 m.

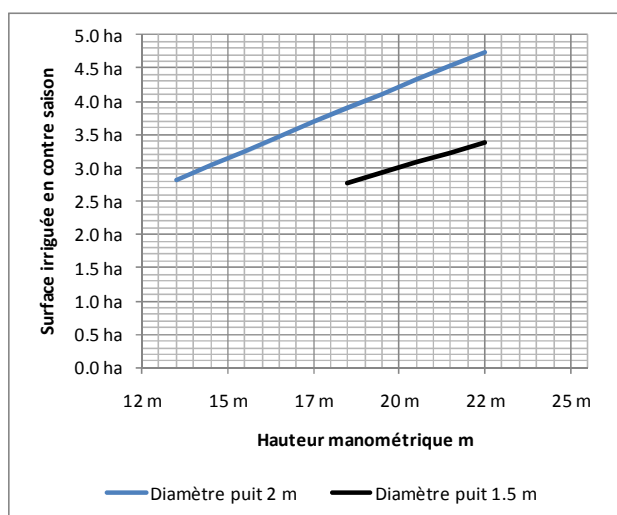
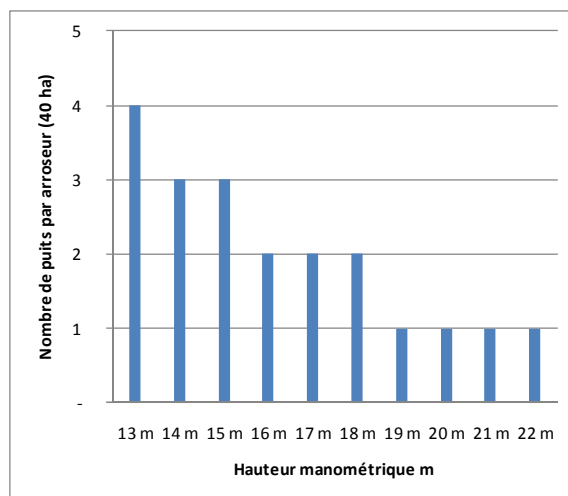


Figure 12 : Estimation de la surface irrigable en contre saison en fonction de la hauteur manométrique de pompage et du diamètre du puits



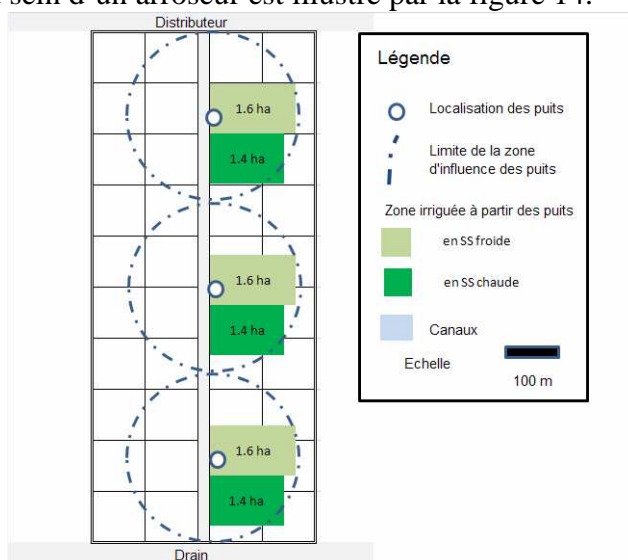
La figure 13 illustre l'évaluation du nombre de puits qu'il est potentiellement possible d'implanter sur un arroseur de 40 ha en fonction du rayon de leur zone d'influence qui est proportionnel au rabattement de la nappe en cours de pompage.

Figure 13 : Estimation du nombre de puits réalisable sur un arroseur de 40 ha



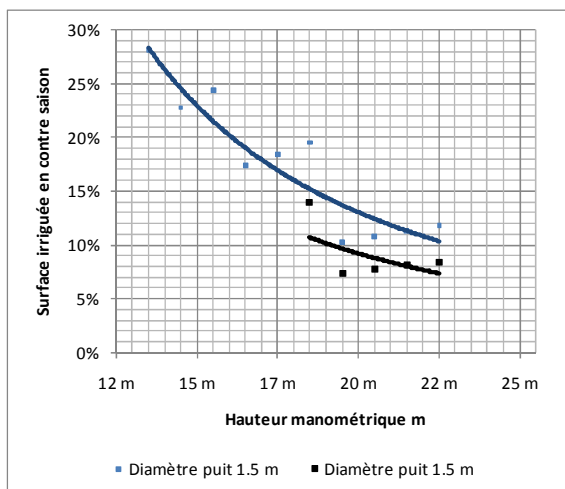
L'implantation possible de ces puits au sein d'un arroseur est illustré par la figure 14.

Figure 14 Illustration de la localisation des puits sur un arroseur (diamètre du puits 2m, HM 14 m)



La figure 15 illustre le pourcentage de la surface aménagée qu'il serait possible d'irriguer à partir de la nappe compte tenu du nombre de puits potentiellement possible d'implanter par arroseur.

Figure 15 : Pourcentage de la surface aménagée irrigable en contre saison à partir de la nappe



Elle montre que des taux d'intensification de l'ordre de 123%, du même ordre que celles pratiquées en 2007 seraient possibles en mobilisant les ressources de la nappe.

➤ **Un obstacle majeur : la rentabilité économique de l'exploitation des eaux souterraines.**

Une estimation des charges d'exploitation faites sur la base des hypothèses formulée par l'étude « d'évaluation quantitative des ressources en eaux souterraines » ([AHT-BETICO \(2011\)](#)) adaptée au contexte des seules zones irriguées a été réalisée pour évaluer les charges de pompage en résultant dans le cas d'un puits ayant un diamètre de 2m et une HM 14 m. permettant d'irriguer en contre saison 3 ha (Tableau 7).

Tableau 7 : Caractéristiques installation de pompage (puits ayant un diamètre de 2 m et une HM 14 m)

Caractéristiques installation station de pompage	
Surface irriguée CSF	1.60 ha
Volume d'eau d'irrigation par ha CSF	5330 m <sup>3</sup> /ha
Volume d'eau d'irrigation CSF	8528 m <sup>3</sup>
Surface irriguée CSC	1.40 ha
Volume d'eau d'irrigation par ha CSC	13750 m <sup>3</sup> /ha
Volume d'eau d'irrigation CSC	19250 m <sup>3</sup>
Total volume CSF + CSC	22278 m <sup>3</sup>
Volume d'eau d'irrigation par hectare	7426 m <sup>3</sup> /ha
Débit de la pompe l/s	3.38 l/s
Débit de la pompe m <sup>3</sup> /h	12 m <sup>3</sup> /h
HM	14.00 m
HMT	15.40 m
Puissance pompe	0.87 Kw

Elle conduit à estimer le cout d'investissement par puits de l'ordre de 5 800 000 Fcfa (Tableau 8).

Tableau 8 : Coût d'une installation de pompage (puits ayant un diamètre de 2 m et une HM 14 m)

Cout investissement	
Puits diamètre 2m profondeur 23 m	4 000 000 cfa
Fourniture pompe	500 000 cfa
Fourniture tuyaux et accessoire	300 000 cfa
Fourniture groupe électrogène	1 000 000 cfa
<i>Total investissement</i>	<i>5 800 000 cfa</i>

Les charges moyennes par hectare en fonction de 3 hypothèses : la surface irrigable est exploitée en contre saison sèche froide et chaude (CSF+CSC), en contre saison froide uniquement (CSF) ou seulement pour la riziculture (CSC).

Le Tableau 9 récapitule leur estimation en fonction de ces hypothèses.

L'estimation de l'impact de ces charges sur la marge par hectare cultivé en fonction des cultures (Tableau 10) amène aux mêmes conclusions que celles formulées par l'étude « d'évaluation quantitative des ressources en eaux souterraines » ([AHT-BETICO \(2011\)](#)); La seule culture du riz en contre saison n'est pas rentable (baisse de la marge de près de 90%).

Elle montre par contre que l'association de la riziculture aux cultures de saison sèche froide permet d'en alléger les charges liées à l'amortissement des équipements.

On peut se demander dans quelle mesure la baisse de marge prévisible continuera à faire des cultures de contre saison une activité attractive.

Tableau 9 : Charges de pompages en fonction des conditions d'exploitations

<b>Cout de pompage</b>	<b>CSF+CSC</b>	<b>CSF</b>	<b>CSC</b>
<b>Cout fixe annuel</b>			
Durée amortissement	10 ans	10 ans	10 ans
Pourcentage d'intérêt sur le capital non amorti	10%	10%	10%
Intérêt moyen sur la période d'amortissement	290 000 cfa	290 000 cfa	290 000 cfa
Amortissement	580 000 cfa	580 000 cfa	580 000 cfa
<i>Cout fixe annuel</i>	<i>870 000 cfa</i>	<i>870 000 cfa</i>	<i>870 000 cfa</i>
<b>Cout variable</b>			
Nombre d'heure de pompage	2280 h	700 h	1580 h
Consommation spécifique l/kwh	0.3	0.3	0.3
Consommation totale carburant	594 l	182 l	412 l
Prix du carburant (diesel)	629 cfa/l	629 cfa/l	629 cfa/l
Cout carburant	373 596 cfa	114 696 cfa	258 900 cfa
Lubrifiant et entretien	93 399 cfa	28 674 cfa	64 725 cfa
<i>Cout variable</i>	<i>466 994 cfa</i>	<i>143 370 cfa</i>	<i>323 625 cfa</i>
<b>Total coût annuel</b>	<b>1 336 994 cfa</b>	<b>1 013 370 cfa</b>	<b>1 193 625 cfa</b>
<b>Cout par hectare</b>	<b>446 000 cfa</b>	<b>633 000 cfa</b>	<b>853 000 cfa</b>

Tableau 10 : Baisse de marges générées par l'exploitation des eaux souterraines

<b>Culture</b>	<b>Hypothèse</b>	<b>Marge actuelle irrigation réseau gravitaire</b>	<b>Marge irrigation souterraine</b>	<b>Baisse de marge</b>
Riz	CSF + CSC	900 000 cfa	519 000 cfa	-42%
Riz	CSC	900 000 cfa	112 000 cfa	-88%
Pomme de terre	CSF + CSC	2 960 000 cfa	2 579 000 cfa	-13%
Tomate	CSF + CSC	1 345 000 cfa	964 000 cfa	-28%
Echalotte oignon	CSF + CSC	1 215 000 cfa	834 000 cfa	-31%
Pomme de terre	CSF	2 960 000 cfa	2 392 000 cfa	-19%
Tomate	CSF	1 345 000 cfa	777 000 cfa	-42%
Echalotte oignon	CSF	1 215 000 cfa	647 000 cfa	-47%

## 5 Conclusion

Les sources d'alimentation de la nappe au niveau d'échelle du Kala inférieur sont la combinaison des infiltrations d'eau venant du Fala, des zones irriguées et des principaux drains. Ce constat repose le problème de l'efficacité du système de drainage de surface à l'Office du Niger d'une façon générale. L'augmentation constatée du niveau de la nappe continentale-alluviale a été de paire avec une augmentation progressive du volume de la nappe due à des apports supérieurs à la capacité d'infiltration du substratum. Face à cette augmentation, la géométrie de la nappe a effectivement évolué : outre une remontée progressive du sommet du dôme qu'elle forme à l'aplomb des zones aménagées, la base de ce dôme a eu tendance à s'élargir en particulier à l'Est dans le sens de la pente du toit du

substatum. Du fait de la continuité hydraulique entre nappe de surface et régionale validée par la comparaison de l'évolution de la nappe de surface et régionale, cette évolution de la nappe a entraîné une diminution du gradient hydraulique de l'écoulement de la nappe régionale et de la nappe de surface qui combinés, aggravent les risques d'engorgement et d'alcalinisation des sols. Les conclusions de cette étude, basée sur une modélisation simplifiée du bilan d'eau de la nappe, relativisent l'importance de l'impact de la pratique des cultures de contre-saison et leurs modes de gestion de l'eau sur sa dynamique. Sans culture de contre-saison, du fait de l'importance des cultures d'hivernage au cours de la période considérée, le niveau de la nappe aurait continué à augmenter : seuls 25% de cette augmentation sont attribuables au développement des cultures de contre-saison (Tangara 2011). Ce résultat est logique si on se réfère à la remontée de la nappe antérieure au développement des cultures de contre-saison.

L'utilisation des ressources en eau souterraines pourraient freiner cette remontée de la nappe en mobilisant annuellement de l'ordre de 98 millions de m<sup>3</sup> soit 55% de son accroissement moyen annuel entre 2001 et 2006.

L'importance relative de son impact et sa faisabilité est néanmoins sujet à caution compte tenu de la qualité et de la disponibilité des données utilisées aux différents niveaux d'échelles qui ont impliqués le recours à des extrapolations et simplifications dans l'analyse, la quantification et la modélisation des processus biophysiques.

On notera en particulier (i) la non adéquation de la distribution spatiale des points de mesure du niveau de la nappe régionale à un suivi de son évolution compte tenu de son développement vers l'Est, des données très partielles de caractérisation des propriétés hydrogéologiques des différents aquifères, (ii) le manque de série de données de suivi des débits entrants et sortants de la zone exploitée relatives à au moins 2 cycles complets de culture (saison d'hivernage et de contre-saison), conditions nécessaires à une validation des hypothèses avancées.

Faute de disposer de ces informations, une modélisation simplifiée a dû être utilisée sans qu'il ait été véritablement possible d'en valider les hypothèses et résultats.

Si elle permet d'identifier des hypothèses, elle ne permet pas de quantifier le poids de chacun des facteurs influençant directement ou indirectement l'évolution de la nappe comme pourrait le faire une modélisation couplée des différents flux d'eau de surface et du fonctionnement de la nappe.

Mieux apprécier l'impact des pratiques agricoles et d'irrigation sur l'évolution de la nappe, mieux connaître les disponibilités en eau souterraines et améliorer la capacité de prévenir les risques qui y sont liés, nécessiterait la mise en place d'un renforcement des dispositifs de suivi et d'une mise en commun et en cohérence systématique des informations recueillies à différents niveaux d'échelles.

## 6 Références bibliographiques

---

AHT GROUP AG. Management and Engineering & BETICO (2001). Valorisation du potentiel agricole dans la zone de N'Débougou. Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine dans la zone Office du Niger. Rapport synthétique de la phase 1 (version provisoire).

AHT/BETICO (2008) ; Inventaire des Informations pour le système d'information pour l'agencement intégrée des ressources en eau (SI GIRE) Synthèse ; Bamako

AHT/BETICO (2009). Etude d'avant-projet sommaire du casier Kandiourou (9.114 ha), Vol. 2 : Evolution du potentiel d'irrigation à l'Office du Niger. Rapport.



AHT/BETICO (2009). Rapport définitif de l'étude d'avant-projet détaillé du casier du bloc« D de M'Béwani, Bamako.

BARRAL, J-P., MARLET, S., N'DIAYE, M.K., VALENZA, A., DICKO MK., TANGARA, B., GRILLOT, J-C., (1996). Fonctionnement des nappes en relation avec la dégradation des sols à l'Office du Niger, rapport technique travaux et études N°2 PSI-Mali., 38 pages et annexes.

BARRAL JP, TANGARA B. (1998) La Gestion de l'Eau dans les Périmètres Irrigués de l'Office du Niger.in Legoupil C et al (ed) Gestion Technique, Organisation Sociale et Foncière de l'irrigation.Dakar :PSI/CORAF, 1998, p 228-253. [14];

BERTRAND, R., B. KEÏTA AND M. K. N'DIAYE (1993) "La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'Office du Niger au Mali)." Cahiers Agricultures 2: 318-329.

BREESS (Bureau de Recherche et Exploitation des Eaux Souterraines et de Surface), (1996). Rapport de prospections géophysique dans le cadre du projet d'appui au système irrigué (PSI) à l'Office du Niger (Niono) station du Sahel. 10 pages, annexes. [6]

BRONDEAU F (2009). Un « grenier pour l'Afrique de l'Ouest » ? : Enjeux économiques et perspectives de développement dans les systèmes irrigués de l'Office du Niger (Mali). GeoCarrefour, Numéro vol. 84/1-2

CASTANY G (1998) Principes et méthodes de l'hydrogéologie 238 p"

DCTP (1990) Synthèse Hydrogéologique du Mali; Département de la Coopération Technique pour le Développement , Mali.

JAMIN, J.-Y. (1994). De la norme à la diversité : intensification rizicole face à la diversité paysanne dans les périmètres irrigués sahéliens : utilité d'une typologie à l'Office du Niger (Mali). Agronomie. Paris-Grignon, INA, INA-PG: 2 vol 318.

KEÏTA N., K.KALOGA, J.F.BELIERES. 1999. D'une gestion étatique de l'eau à une gestion paritaire Etat/Usagers : le cas de l'Office du Niger au Mali. HYDROTOP 99, Marseille du 15 au 17 juin 1999.

KEITA, I., BELIERES, J.-F., AND SIDIBE, S. 2001. Gestion du système hydraulique de l'Office du Niger: évolutions récentes et perspectives.

LLAMAS MR, MARTINEZ-SANTOS P. Intensive groundwater use: a silent revolution that cannot be ignored. Water Science and Technology 2005; 51: 167-74

MARLET S, N'DIAYE MK (2009) La fertilité des sols. Des risques d'alcalinisation liés à l'irrigation et aux pratiques culturales in L'Office du Niger, grenier à riz du Mali. Montpellier : CIRAD, p. 163-168.

MARLET S, TANGARA B, OUVRY F Bilan des eaux et des sels à l'échelle des périmètres à l'Office du Niger. Compte-rendu des expérimentations. Travaux et études 7. Niono, Mali : PSI, , 1998.

MINISTERE DE MINES, DE L'ÉNERGIE ET DE L'EAU/DANIDA (2006) : Appui à l'Elaboration et la Mise en oeuvre des Politiques et Stratégies Nationales en matière d'Eau et d'Assainissement

MINISTERE DES MINES, DE L'ÉNERGIE ET DE L'EAU (2007). Rapport de la phase initiale du projet, Volet Hydrochimie ; Bamako, Mali.

N'DIAYE M.K. ET GUINDO D. (1998). Evolution des sols irrigués de la vallée du Niger (Mali) ;Niono, Mali

OFFICE DU NIGER (2010) Schéma Directeur de l'Office du Niger. ON, Ségou et Bamako.

OFFICE DU NIGER 2010 27ème Session ordinaire du conseil d'administration de l'Office du Niger 6 janvier 2011 ; Bilande la campagne agricole 2009-2010, ON, Ségou.

OFFICE DU NIGER (2011). Bilan des Irrigations, Contre-Saison et Hivernage 2010 ; Ségou, Mali.

OUVRY F, MARLET S. (1999) Suivi de l'irrigation et du drainage. Etude des règles de gestion de l'eau et bilans hydro-salins à l'Office du Niger (cas de la zone de Niono, Mali). In Synthèse des résultats PSI. Niono, Mali : IER,

OUVRY, F., N'DJIM, H., KUPER, M., HAMEL, E., AND BARRAL, J.-P. 2002. La gestion de l'eau: un équilibre entre apports et drainage.

PACTEA (2010) Exécution des travaux de forage dans les régions de Ségou et Mopti,Rapport Hydrogéologique, C. Lotti&Associati, Mali

PROGRAMME DES NATIONS UNIS POUR LE DEVELOPPEMENT : PNUD (1990). Synthèse hydrologique du Mali. Rapport, 300 pages. Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie (DNHE), Bamako, Mali.

PROGRAMME DES NATIONS UNIS POUR LE DEVELOPPEMENT : PNUD (1979). Etude géophysique par méthode électro-sismique du ranch de Niono. Rapport géophysique, 10 pages, 5 cartes.

SANGARE A (2010). Etude relative a l'établissement d'un bilan des ressources en eau audroit de la zone de l'Office du Niger, BAD, Bamako.

SCHÜTTRUMPF, R. ET BOEKKERS, T. (2008). Analyse du potentiel d'irrigation lors de la saison sèche dans la zone de l'Office du Niger, Mali

SNAPSHOT KFW (2010). Adaptation to climate change in Upper and Middle Niger River Basin: River basin.

TRAORE AZ, Hamadoun B MAIGA, TANGARA B (2010). Projet d'étude des potentialités d'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation à l'Office du Niger. Projet de recherche soumis à l'IWMI dans le cadre de son programme « Groundwater in Sub-Saharan Africa, implication for food security and livelihoods.

VALENZA, A. (1996). Rôle des eaux souterraines et d'irrigation dans les processus de salinisation / alcalinisation des sols en zone sahélienne : cas du Delta Intérieur du Niger (MALI). Diplôme d'Etudes Approfondies, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 75 pages et annexes.

VAN DER STICHT, M. BAMBA, F. SYLLA, M. (2010). Mission d'expertise pour le suivi des ressources en eau de surface et en eaux souterraines dans la région de Koulikoro et Ségou.

VANDERSYPEN, KLAARTJE, (2007). Improvement of collective water management in the Office du Niger irrigation scheme (Mali) : Development of decision support tools. Thesis.